

同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の地震時応答制御設計法に関する研究

著者	杉村 義文
号	56
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4672号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61633

すぎむら よし ふみ

氏 名 杉 村 義 文

授 与 学 位 博士 (工学)

学位授与年月日 平成24年3月27日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学専攻

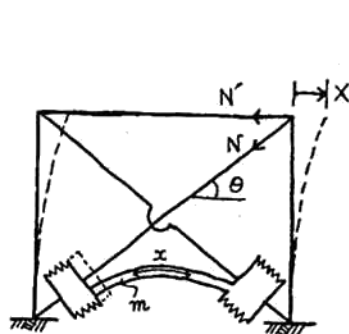
学 位 論 文 題 目 同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の地震時応答制御設計法に関する研究

指 導 教 員 東北大学教授 井上 範夫

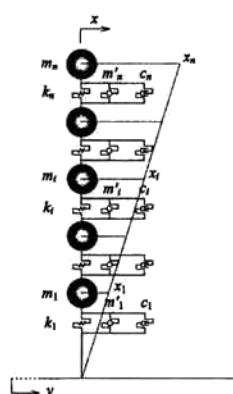
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 源栄 正人
東北大学教授 植松 康 東北大学准教授 五十子 幸樹
教授 上谷 宏二 (京都大学)

論 文 内 容 要 旨

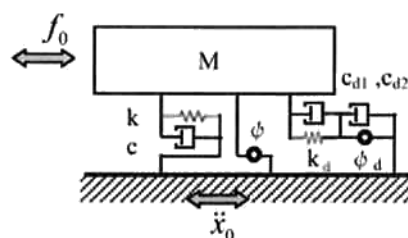
近年、建築構造物の耐震設計において、地震時の建物応答の低減、構造骨組の損傷の低減などを目的として地震入力エネルギーを集中的に吸収する制振装置を設けることが多い。制振装置には、金属材料の塑性変形時のエネルギー吸収を利用したものや粘性体の速度抵抗時のエネルギー吸収を利用したものなどが存在し、これらは装置両端間の変位差や速度差あるいはその両者に依存して性能を発揮するものである。また、同調質量ダンパーのように制御対象構造物に付加的な質量要素を取り付けて装置に作用する加速度に依存して性能を発揮し、支持部材剛性と粘性減衰を適切に同調させることによりエネルギー吸収を図る方法が提案されている。これらと異なり、要素間の相対加速度に応じて慣性力を発揮する質量要素を利用した応答制御に関する研究がある。古くは例えば川股らの研究に遡る。フレーム内に相対加速度に応じて慣性力を発揮する要素を設けた場合の応答制御に関する検討を行っている。近年の代表的な例として、石丸・古橋らは、運動方程式の質量項に着目し、加速度差に応じて慣性力を発揮するこのような要素を慣性接続要素と呼び、多質点振動系のモード制御法を提案している。また、磯田・半澤らは、慣性接続要素と粘性減衰要素および支持部材要素を複数のパターンで組み合わせた振動系の応答制御効果について検討を行っている。



質量ポンプを組み込んだ
一層フレーム



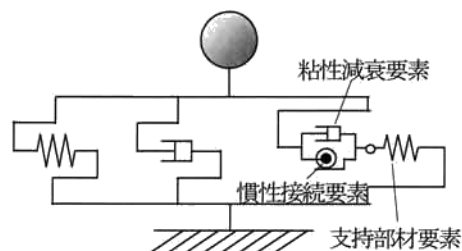
慣性接続要素を有する
多質点振動系



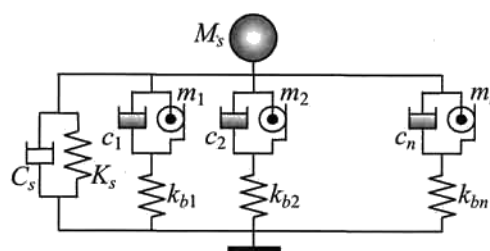
並列型と直列型を併用
した振動モデル

一方、斉藤らはこれまで、粘性減衰要素に慣性接続要素を並列に配置し、適切な剛性を有する支持部材要素を直列に接続して構成されるダンパーを構造物に適用した場合の応答制御について理論的、実験的に検討している。このような慣性接続要素、粘性減衰要素および支持部材要素の三要素からなるシステムを「同調粘性マスダンパー制振システム」と呼んでいる。本システムは建物の運動にダンパーを同調させ、粘性減衰要素の運動が建物層

間変形の運動に比べて大きく増幅することで高い減衰効果を得ることができる新しい制振システムである。木田らはこれを発展させ、同調粘性マスダンパーを多重に設置することで、単独の場合と同等の応答倍率低減効果を少ない量の慣性接続要素質量及び粘性減衰係数にて実現できることを示している。本制振システムの実用上のひとつのメリットとしては、軸力制限機構を利用することで、応答低減効果を大きく損なわずに最大ダンパー力を低減できることが示されている。これを利用することで、従来の粘性系のダンパーよりも小さなダンパー力で必要とする応答制御効果を得ることができる可能性がある。

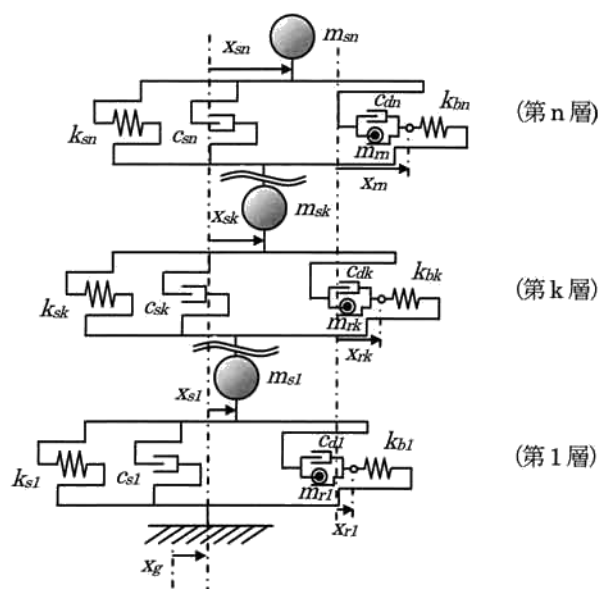


同調粘性マスダンパー制振システム



多重同調粘性マスダンパー制振システム

同調粘性マスダンパーによる応答低減効果は、慣性接続要素の質量の大きさ、粘性減衰要素の粘性係数の大きさ、支持部材要素の剛性の大きさによって変化する。本ダンパーの設計法については、既に定点理論を用いて変位応答倍率や加速度応答倍率あるいは動的応答倍率の最大値を最小化する「最適応答制御法」が提案されている。この方法は慣性接続要素の質量と主体構造の質量の比のみによって支持部材剛性と粘性減衰係数の設計解が求まり、実用面においても有用な方法である。ただし、本設計法においては、性能の指標として各種応答倍率が用いられており、このような応答倍率を指標とする設計法はその有効性から広く提案されているが、得られる設計解が非定常な入力である地震動入力時の応答低減を考えた場合の最適な設計解と必ずしも一致するとは限らない。また、設計の実務におけるように、例えば制御対象構造物の特性と設計用入力地震動が与えられ、最大変位や最大ダンパー力など地震時応答について具体的な目標値が定められた場合に、条件を満足するダンパーの設計解を直接的に求めることは容易ではない。このように、応答倍率を制御対象とした定点理論に基づく最適応答制御法から、地震時応答を直接取り扱った設計法への展開が望まれる。そこで本論文では、同調粘性マスダンパーを多層建築構造物に適用する際の地震時応答を直接取り扱った設計法を構築することを目的とする。



同調粘性マスダンパーを有する多自由度振動系のモデル図

本論文は、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の地震時応答制御のための設計法について論じるものであり、次の7章からなっている。

第1章では、研究の背景、本研究に関連した既往の研究、本研究の目的と課題および本論文の構成について述べている。

第2章では、同調粘性マスダンパー制振システムの概要について述べている。はじめに、本制振システムの構成について示し、本論文で用いる主な記号の定義を示している。次に、本ダンパーを有する1自由度振動系の振動方程式と地動調和加振に対する振動特性について、続いて、定点理論に基づいた最適応答制御設計法について示している。最後に、本制振システムを多層建築構造物に適用する際の一つの設計法である、既往の最適応答制御法による多層建築構造物の概略設計法について示し、さらにこの設計法を拡張し、同調させるモードを任意とした設計法、層方向へのダンパーの配分を任意とした設計法について示している。

第3章では、同調粘性マスダンパーを有する最も単純な一自由度建物振動系を対象とし、地震時応答の現象の解明を行っている。はじめに、本ダンパーの特性値を設計変数とした場合の設計変数空間におけるシステムの変位応答倍率の最大値の分布の構造を分析し、本システムの変位応答倍率および地震時応答変位の最大値の分布には一部に極小値を有している領域が存在すること、定点理論に基づく設計解は主体構造の粘性減衰がない場合の極小値に相当し、主体構造の粘性減衰がある場合においては極小値に近い値を与えることを明らかにしている。次に、数理計画法を用いた最適設計手法により、定点理論による最適応答制御法と同様の問題を考え、数理計画法を用いた最適設計手法は定点理論による最適応答制御法と同等の解を求めることができることを示している。続いて、設計変数空間における地震時応答変位、ダンパー力の最大値の分布の構造を分析し、定点理論に基づく設計解の位置関係について明らかにしている。最後に、地震時応答変位、ダンパー力を指標とし数理計画法を用いた最適設計手法を提案し、数理計画法を用いた最適設計手法は地震時応答を指標としてダンパーの設計解を得ることができることを示している。

第4章では、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の振動特性を明らかにしている。はじめに、本システムの振動方程式の定式化を行い、次に本システムの振動特性を把握するために固有値問題を構成している。本システムは非比例減衰系となり、実数固有値解析を通じて近似的にモーダルアナリシスを実施することも可能であるが、厳密にモーダルアナリシスを実施するためには、振動方程式の粘性減衰項を考慮した複素固有値解析が必須となる。そこで、本システムの実数固有値問題、複素固有値問題を構成し、それぞれの固有周期、刺激関数およびモード減衰について示している。その結果、各層全ての同調粘性マスダンパーを主体構造のあるモードに同調させた場合、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物は同調させたモード周辺に固有周期の近接した複数のモードを有すること、近接したモードの内一部のモードにはダンパーがない場合の同調させたモードを分解したものが現れ、近接したモード以外のモードにはダンパーがない場合のその他のモードが現れること、各層全ての同調粘性マスダンパーを主体構造のあるモードに同調させた場合、同調させたモードの減衰を選択的に上昇させることを明らかにしている。続いて、本システムの振動数特性について示し、外乱として調和地動を考えた場合の各層の層間変形の応答倍率について、各層全ての同調粘性マスダンパーを主体構造のあるモードに同調させた場合、ダンパーがある場合の応答倍率はダンパーがない場合の応答倍率に比べて同調させたモード付近において小さくなり、同調させたモードの応答倍率を選択的に低減することを明らかにしている。

第5章では、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の数理計画法を用いた設計法について述べている。はじめに、本制振システムのスペクトルモーダルアナリシスについて示している。本制振システムは非比例減衰系であることから、地震時応答評価方法としてシステムの複素固有値解析の結果を利用する拡張CQC法を用いることとしている。比較のために、他の単純な方法についても示し、拡張CQC法の評価精度について時刻歴応答解析による最大応答値と比較して検証を行っている。その結果、複素固有値解析の結果を利用する拡張CQC法を用いた応答スペクトルによるモーダルアナリシスは、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の地震時の平

均的な最大応答を精度良く評価できることを示している。次に、数理計画法を用いた設計手法を提案し、次の興味深い二つの問題について設計例を示している。一つ目の設計例は、建物層方向へのダンパーの効果的な配分に関する問題であり、二つ目の設計例は、複数のモードへのダンパーの効果的な配分に関する問題例である。設計例を通じて、それぞれの興味深い問題に対するひとつの答えを導くと同時に、本設計法の有効性を確認している。

第6章では、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の地震時応答制御設計法について示している。本制振システムの設計法に関しては、第5章に示したように拡張CQC法を通じてシステムの地震時応答を精度よく評価し、その結果を用い数理計画法を適用して最適設計手法による設計が可能であることを示しているが、この方法では手順が煩雑であり実用性は高くなく、より実用的な設計法への展開が望まれる。はじめに、本制振システムの地震時応答を実用上十分な精度にて、かつ簡便に予測する二つの方法を提案している。一つ目の予測手法は、主体構造とダンパーの慣性接続要素と支持部材要素のみを考慮したシステムの固有値解析から、非連成近似による減衰定数の評価によりダンパーによる応答低減効果を考慮し、単純なスペクトルモーダルアナリシスSRSSを用いた方法である。二つ目の予測手法は、さらに簡便さを高めたもので、主体構造のみの固有値解析から質量比を算出し、一自由度振動系に本ダンパーを設置したシステムの減衰の評価によりダンパーによる応答低減効果を考慮し、単純なスペクトルモーダルアナリシスSRSSを用いた方法である。次に、提案した応答予測手法を用いた地震時応答制御設計法を構築し、10層建物と20層建物を用いた設計例を通じて、本章で構築する設計法の有効性を確認している。最後に、本論文および既往の研究で提案されている各設計法の特徴と位置付けを整理し、状況に応じて使い分けることで本制振システムの理論的な設計が可能となることを示している。

第7章は、結論であり、本研究で得られた成果および今後の展望と課題について述べている。

論文審査結果の要旨

兵庫県南部地震以降、大地震時に人命を守るだけでなく建物としての財産を保持することを目的として、地震に対する建物の損傷を制御する制振構造の設計法が提唱され、実建物に多く採用されるようになった。本論文は、制振システムの一つとして、慣性接続要素、粘性要素、支持部材要素の3要素からなる同調粘性マスダンパーシステムを多層建築構造物に配置し、その応答性状を地震応答解析で明らかにするとともに、地震時応答制御設計法を提案するもので、全7章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、慣性接続要素、粘性要素、支持部材要素の3要素からなる同調粘性マスダンパーシステムの概要を述べ、1自由度系における基本的振動特性を示すとともに、定点理論および制震性能曲線に基づいた最適応答制御法について概説している。

第3章では、同調粘性マスダンパーを有する1自由度建物振動系を対象に、ダンパー特性値を設計変数とする地震時応答性状を明らかにしている。さらに、数理計画法を用いた最適設計手法により設計変数空間における応答最大値を求める手法を提案し、主体構造である建物の減衰を考慮した場合の最適値を算定しうることを示すとともに、その解が建物の減衰を無視せざるをえなかった従来の定点理論を包含する一般的な解であることを示している。

第4章では、同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物を対象とし、本システムが非比例減衰系であることを考慮して複素固有値問題で厳密解を求めるとともに、ダンパー減衰を無視して算定した実固有値モードと比較して、振動特性を明らかにしている。その結論として、本ダンパーシステムは、同調させる実数モードを二つに分裂させるとともにそのモード減衰を大きくさせ、対象としないモードについては変化させないという制振効果を与えており、対象とする同調モードのみを選択的に応答低減させていることを示している。

第5章では、数理計画法を用いた同調粘性マスダンパーを有する多層建築構造物の設計法について論じている。検討にあたっては、システムとして得られた複素固有モードを基にした拡張CQCを用いてスペクトルモーダルアナリシスを行い、時刻歴応答解析結果と比較して、地震時の平均的な最大応答値を精度よく評価できることを示している。さらに、この結果を踏まえて数理計画法を用いた設計手法を提案し、それを用いて、建物高さ方向においては建物固有モードの層間変形が大きい所にダンパーを設置するのが効果的であること、また、1次モードのみではなく高次モードも含めるとより少ない付加質量で目標性能を満たすことができることを示している。

第6章では、実際の設計への適用性を配慮して、複素固有値問題を扱わず、実数モードを用いた簡易な二つの設計手法を提案している。具体的には、主体構造およびダンパーの慣性接続要素と支持部材要素のみを考慮したシステムの固有値解析から非連成近似により減衰定数を評価する方法と、主体構造のみの固有値解析から付加質量比を求め、それに対応して求める1自由度振動系での減衰定数を評価する方法に基づき、ダンパーの応答低減効果を考慮して自乗和平方根によるスペクトルモーダルアナリシスを行なっている。この方法を10層建物に適用した計算例により、本システムの応答を精度よく評価できることを示している。

第7章は、結論である。

以上を要するに、本論文は、同調粘性マスダンパーを多層建築構造物に設置することにより、効果的に建物応答を制御できることを示すもので、建物の地震時応答制御設計の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。